

1549723

На правах рукописи

Морогов Владимир Михайлович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА
И КОНСТРУИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВИНТОВЫХ
ПРЕССОВ ДЛЯ ШТАМПОВКИ С УМЕНЬШЕННЫМИ ПРИПУСКАМИ
ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Специальность 05.03.05 - Процессы и машины обработки
давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук



Москва 1995

Работа выполнена в акционерном обществе открытого типа
научно-производственном объединении,
Поволжский авиационный технологический институт
АООТ НПО АВТИ

Научный консультант - доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент академии естественных наук Ю. А. Бочаров

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор	Н. С. Добринский
доктор технических наук, профессор	Л. И. Живов
доктор технических наук, профессор	Ю. А. Миропольский

Ведущее предприятие: Самарское акционерное общество открытого
типа "Моторостроитель"

Защита диссертации состоится " 24 " 04 1996 г.
в 14³⁰ час. на заседании диссертационного совета

Д053.15.05 при Московском государственном техническом универси-
тете имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманс-
кая, д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в I-ом экземпляре, заверенный
печатью, просим направить по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н. Э. Баумана.

Автореферат разослан " 20 " 03 1996 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент

В. И. Семенов

В. И. Семенов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема предупреждения усталостных разрушений деталей машин весьма актуальна для всех отраслей машиностроения, особенно в авиации при производстве двигателей летательных аппаратов. Большинство отказов газотурбинных двигателей (ГТД) на этапах доводки и эксплуатации связаны с проблемами прочности деталей и узлов, вызванные усталостными дефектами.

По частоте появления усталостных дефектов в основных деталях двигателя их можно расположить в следующий ряд: рабочие лопатки компрессора, рабочие лопатки турбины, диски компрессора и т. д.

В деталях ГТД до 17% составляют технологические дефекты, вызванные несовершенством процесса штамповки. Максимальное сопротивление усталости деталей, включая и лопатки ГТД, может быть обеспечено совершенствованием технологического процесса производства лопаток, включая процесс штамповки, позволяющий реализовать прочностные свойства, заложенные в применяемом материале.

Для получения наибольших прочностных свойств лопаток технологический процесс изготовления должен гарантировать отсутствие в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений. Растягивающие остаточные напряжения величиной от 60 ... 520 МПа и глубиной 20 мкм образуются в поверхностном слое штампованной лопатки при последующей механической обработке, например, при фрезеровании и шлифовании.

Поэтому при штамповке лопаток необходимо уменьшить припуск на сторону по перу до 0,02...0,05 мм для последующей финишной обработки, а также целесообразно уменьшить значение шероховатости наружной поверхности до значений $Ra = 2,5$ мкм с целью исключения механической обработки (фрезирования и шлифования). С целью уменьшения припуска на заготовке лопатки необходимо осуществлять процесс точной штамповки.

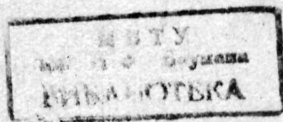
Перспективным направлением научных исследований в области получения высококачественных поковок и штамповок сложных по форме (например, лопаток ГТД) методом горячей штамповки, максимально приближенных к размерам готовой детали, является разработка и внедрение новых технологических процессов с использованием винтовых прессов, построенных по оптимальному принципу и с оптимальным управлением. Учитывая также, что в авиационной и других отраслях

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1549723

Морогов В.М. Разработка ме



промышленности РФ находится в эксплуатации более 8,0 тысяч винтовых прессов как отечественных, так и импортных, является актуальной разработка новых, специализированных и совершенствование существующих машин для точной штамповки.

Всего в отрасли до 70% штамповок лопаток ГТД получают на винтовых прессах. Между тем, на большинстве предприятий отрасли средний коэффициент использования металла (КИМ) составляет не более 0,2.

Внедрение в отрасли комплексных технологических процессов и специализированного оборудования для точной штамповки лопаток ГТД в развитии отраслевой целевой комплексной программой "Лопатка" позволяет:

- повысить механические свойства;
- стабилизировать качество;
- повысить технический уровень производства;
- обеспечить значительное повышение КИМ (до 0,6), т.е. в 2-3 раза;
- снизить трудоемкость изготовления на 40-60%;
- уменьшить объем ручных доводочных работ на 50-60%.

Решение этих вопросов является актуальной и большой народнохозяйственной задачей.

Ц е л ь р а б о т ы . Разработка научно-обоснованных методов проектирования перспективных моделей винтовых прессов, обеспечивающие решение крупной народнохозяйственной проблемы, повышение точности штамповки и производительности при производстве заготовок лопаток ГТД с высокими прочностными свойствами и при минимальных затратах энергии, создание их и внедрение на заводах авиационной отрасли.

В связи с этим важным и актуальным в настоящее время является решение следующих вопросов:

- провести анализ конструкций, параметров, теории расчета современных винтовых прессов, приводов и их систем управления с целью выявления тенденций их совершенствования, направления развития и области применения данного оборудования для точной штамповки лопаток ГТД;
- выполнить аналитические исследования по оптимизации таких важных параметров машины, как скорость движения рабочих частей, параметров привода и управления;
- провести экспериментальную проверку правомерности допуще-

ний, принятых при теоретических исследованиях на экспериментальных, опытно-промышленных и серийных образцах винтовых машин, включая исследования устройств и систем точного дозирования и регулирования энергии удара;

- разработать конструкции и методы инженерного расчета специализированных винтовых прессов и фундаментов под них для точной штамповки лопаток ГТД с учетом оптимизации размеров и параметров;
- внедрить результаты разработок в промышленность и дать рекомендации по проектированию оптимальных узлов машины, элементов гидроприводов и систем точного дозирования энергии удара винтовых прессов усилием до 25 МН.

Методы исследования. При выполнении работы были использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. При теоретическом исследовании для определения эффективных параметров винтовых прессов, их приводов и систем управления использовались теории: винтовых и гидровинтовых машин, разработанные в первую очередь в Московском техническом университете им. Н.Э. Баумана рядом ученых проф. А.И. Зиминим, Ю.А. Вочаровым, Ю.А. Зиминим, А.В. Сафоновым и другими; а также теории оптимального управления; автоматического управления и регулирования; колебаний; динамики гидро- и пневмосистем и др.

В результате исследования автором были получены аналитические уравнения, зависимости и такие показатели качества переходных процессов в период хода разгона рабочих частей и деформирования, как критерия оптимальности, позволяющий определить для каждой марки материала оптимальные значения скорости рабочих частей винтовых прессов в момент штамповки в зависимости от пластичности металлов, скорости релаксации напряжений и упрочнения, а также оптимальные параметры привода и систем управления. Методика определения эффективных параметров винтовых машин включает составление и решение (с применением ЭВМ) уравнений оптимального управления с последующей проверкой оптимальных величин по различным дополнительным показателям, указывающих на эффективность исследуемого параметра.

Эксперименты были проведены на физических моделях в НИЛ гидровинтовых машин КуИСИ им. Микояна (1980-1983 г.), опытно-промышленных установках в 1990-1995 гг. на промышленных предприятиях в городах Самаре, Чимкенте, Москве, Казани и Балашихе с применением современной электронно-усилительной и регистрирующей аппаратуры.

Надежность экспериментальных данных принято равной 0,95. При экспериментальном исследовании использовались статистические методы обработки результатов измерения, метод планирования эксперимента при поиске оптимальных условий и др.

Полученные в результате теоритических исследований, аналитические решения (с применением ЭВМ) переходных процессов в системе приводов и управления винтовых прессов были уточнены и сопоставлены с результатами экспериментальных исследований и показали хорошую сходимость значений в пределах 85 ... 92% .

Научная новизна. Разработаны научно-обоснованные методы расчета и конструирования специализированных винтовых прессов для точной штамповки лопаток ГТД максимально приближенных к форме готовой детали с высокими прочностными свойствами и минимальными затратами энергии, т.е. разработаны методы инженерного расчета и построения винтовых машин (работающие в дискретном режиме) по оптимальному принципу и с оптимальным управлением. Это принципиально новая постановка задачи в области кузнечно-штамповочного производства и ее решение направлено на повышение эффективности винтовых прессов.

При решении этой задачи был предложен аналитический метод составления и решения дифференциальных уравнений движения рабочих частей винтовых прессов с насосно-аккумуляторным приводом.

Аналитический метод включает в себя разбивку систем привода и управления винтовой машины на отдельные динамические звенья, (например: баллон с газом, трубопровод с газом и жидкостью, аккумулятор, клапан и др.) и затем составление и решение общего уравнения движения ползуна с учетом динамических свойств звеньев этой системы.

Настоящий метод является продолжением и развитием работ выполненных в Московском техническом университете им. Н. Э. Баумана д. т. н. проф. Ю. А. Вочаровым и этот метод позволяет определить начальный период движения рабочих частей винтовой машины с учетом запаздывания сигнала управления, более просто оптимизирует параметры отдельных динамических звеньев и позволяет выявить входные параметры системы, которые наиболее эффективно влияют на скорость и энергию удара.

Практическая ценность. В результате развития работ по отраслевой комплексной целевой программе "Лопатка" освоено на винтовых прессах производство точной штамповки лопаток

компрессора и турбины ГТД с длиной пера лопатки до 350 мм из жаропрочных и легированных материалов и сплавов, в том числе из титана, на заводах авиационной отрасли Казани, Перми, Уфе, Запорожье, Рыбинске, что позволило повысить КИМ данных деталей в 2-3 раза и точность штамповки на один класс.

Даны рекомендации по совершенствованию гаммы винтовых кузнечных машин усилием 4-25 МН, ранее проектируемые и изготавливаемые Чимкентским производственным объединением по выпуску кузнечно-прессовых машин (ЧПО КПО) в 1983-85 г. В частности даны рекомендации по проектированию узлов винтового пресса: пары винт-гайка; размеров маховика; элементов гидропривода; аккумулятора-мультипликатора со встроенным клапаном, объема баллонов с газом и систем точного дозирования и регулирования скорости и энергии удара.

Спроектировано 15 единиц как новых, так и усовершенствованных винтовых прессов под руководством автора для точной штамповки лопаток ГТД. Внедрение ряда разработок на заводах отрасли, позволило получить значительный экономический эффект за счет повышения КИМ в 2-3 раза, снижения трудоемкости механической обработки на 40-60% объема доводочных работ на 50-70%.

Основные положения, выносимые на защиту.

- Методика инженерного расчета и конструирования специализированных винтовых прессов и фундаментов под них для точной штамповки лопаток ГТД с использованием теории оптимизации;

- Методика определения усилия до 10 МН и эффективной энергии удара до 400 КДж винтовых прессов по осадке одного медного образца (крешера) с погрешностью до 6,5 % на основе метода моделирования процесса горячей штамповки;

- Теоретические и экспериментальные исследования новой системы бесступенчатого регулирования энергии удара с оригинальным устройством аккумулятора-мультипликатором;

- Методика аналитического расчета кинематических параметров (перемещение, скорости и ускорение) рабочих частей с гидроприводом винтового пресса в период хода разгона с использованием опытных коэффициентов, получаемых при обработке данных записи перемещения на пленку или бумагу датчиком-струнным ходографом.

- Новые конструкции специализированных винтовых прессов для изготовления фасонных заготовок лопаток ГТД методом выдавливания.

А п р о б а ц и я р а б о т ы . Основные результаты работы были доложены в НИЛ гидровинтовых машин КУИСИ им. А. И. Микояна, на

научно-техническом и ученом совете КуИСИ им. Микояна (г. Самара, 1981 и 1983 г.), Самарском аэрокосмическом университете им. С. П. Королева (г. Самара, 1995г.), на пятой всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование кузнечно-штамповочного оборудования ударного действия" (г. Ижевск, 1979г.), в Чимкентском производственном объединении по выпуску кузнечно-прессовых машин (г. Чимкент, 1980г. и 1985г.), на научно-технических советах НИИ двигателей (НИИД), затем Поволжского научно-технологического центра (АНТЦ, г. Самара, 1993-1995г.), Поволжском НПО АВТИ (г. Самара, 1995г.) и на Всероссийской научно-технической конференции "Оборудование и процессы обработки давлением" (г. Москва, 1995г.).

П у б л и к а ц и и. Основное содержание диссертации изложено в 29 работах, в том числе: в 17 статьях, опубликованных в центральных журналах; в 5-ти отчетах НИР, зарегистрированных во ВНИИЦентре и ВИМИ, в шести авторских свидетельствах, в 1 книге (монографии).

Ст р у к т у р а и о б ъ е м д и с с е р т а ц и и.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, основных выводов и результатов работы, списка литературы и приложения. Она содержит 286 страниц машинописного текста, 70 рисунков, 38 таблиц и списка используемой литературы из 106 наименований.

С о д е р ж а н и е р а б о т ы. Во введении изложена проблема предупреждения усталостных разрушений деталей газотурбинных двигателей (лопаток, дисков и т.д.), показана актуальность работы, ее научная новизна и практическая ценность, а также ее значение как продолжение и развитие отраслевой целевой комплексной программы "Лопатка" и работ научной школы проф. А.И. Зимина (МГТУ им. Баумана) по разработке и совершенствованию винтовых кузнечных машин для точной штамповки деталей ГТД.

В первой главе изложено современное состояние изучаемого вопроса.

Современное состояние технологии и оборудования для точной и малоотходной штамповки лопаток ГТД характеризуется тем, что особенно эффективно используются винтовые прессы в авиационной промышленности для получения компрессорных и турбинных лопаток ГТД и других деталей сложной формы из жаропрочных и высокопрочных металлов и сплавов (например, титановых ВТЗ-1, ВТ8, ВТ8У, В30 и других). Данное оборудование в этой отрасли промышленности составляет до 70% от общего парка штамповочного оборудования (см. рис.)

Все это ставит вопросы совершенствования конструкции винтовых машин, систем привода и управления-актуальной задачей. В данном разделе работы дан анализ и классификация систем управления винтовыми прессами, по шести наиболее существенным признакам (способу регулирования энергии, принципу работы, характеру задающего воздействия, характеру управления, виду энергии и числу контуров, используя которые можно любую систему управления винтовыми прессами отнести к тому или иному классу систем и оценить новую систему на перспективность. Анализ систем управления показал, что наиболее перспективной системой управления винтовыми прессами является та которая при изменении режимов работы машины способна находить наиболее оптимальный вариант управляемых величин, обеспечивающих получение от объекта управления наибольшей эффективности. Дан анализ систем управления винтовыми прессами по таким показателям, как стабильность удара, коэффициент энергоемкости, точность системы управления, коэффициент эксплуатационной надежности. В составлении классификатора систем управления принимал участие канд. техн. наук В. П. Перевертов.

Выполнен анализ современной теории расчета и методов определения основных параметров винтовых машин и их приводов, разработанной научной школой проф. А. И. Зимина в Московском техническом университете им. Н. Э. Баумана проф. А. И. Зиминым, проф. Ю. А. Бочаровым и анализ последующих работ, выполненных проф. Ю. А. Зиминим, проф. А. В. Сафоновым, доцентами: Ю. Д. Морозовым, С. С. Гужиним, А. П. Денисюк, Ю. А. Артемовым, С. И. Беляевым, В. П. Перевертовым, В. Е. Пашиним, Н. Е. Корочкиным и др. авторами, по уточнению и проверке на опытно-промышленных образцах разработанной теории.

Дан анализ теоретических работ по влиянию основных конструктивных параметров и параметров гидропривода на скорость и энергию удара винтовых прессов, выполненных в 1980 и 1985 г. в НИИ гидровинтовых машин КуИСИ им. А. И. Микояна и в последующие 1985-95 годы в НИИ под научным руководством автора данной работы.

Изложена постановка задачи и общий план исследований.

Во второй главе изложены методы оптимизации параметров винтовых прессов и их приводов с учетом динамики переходного процесса.

Оптимизация параметров винтовых прессов, приводов и систем управления выполнялось по следующей методике:

- разрабатывались математические модели динамических процессов таких как: горячая штамповка, движение рабочих частей

пресса в период хода разгона и т. д.;

- составлялись целевые функции (показатели качества процесса штамповки, переходного процесса в системе привода и управления), обеспечивающие минимум потерь энергии при штамповке и управлении;

- выбирались " жесткие" и " не жесткие" ограничения на входные выходные параметры;

- решались уравнения оптимального управления ;

- проводилась экспериментальная проверка полученных аналитических уравнений оптимального управления.

В частности, в работе рассмотрен вопрос об определении оптимальной скорости движения рабочих частей винтовых прессов, в момент удара, исходя из рассмотрения динамической модели деформируемого тела при горячей штамповке и установленные А. И. Целиковым, Е. А. Поповым, С. И. Губиным, А. А. Илюшиным и др. авторами связями между средними скоростями деформации и деформирования при выполнении на прессе операции осадки заготовки.

При составлении математической модели деформируемого тела при горячей штамповке были использованы свойства динамических моделей таких тел, как тела Максвелла и Шведова, учитывающие два одновременно происходящих процесса: упрочнение и релаксацию.

В результате исследования было получено дифференциальное уравнение в общем виде, включая частное решение, предложенное А. И. Целиковым, связывающее между собой деформацию тела, напряжения, скорости их изменения и время процесса. Показателем качества процесса горячей штамповки выбрано абсолютное интегральное отклонение величины истинного напряжения в металле, возникающее при осадке заготовки от эталонного напряжения (эталонное напряжение в металле такое, когда скорость деформации не оказывает влияние на величину напряжения, например, напряжение полученное при статических испытаниях). В качестве напряжения по минимуму скорости были приняты экспериментальные данные по заполняемости явужор штампа и стойкости инструмента. В результате выполненного исследования была вычислена оптимальная скорость рабочих частей винтового пресса для сталей, равная 2,25 м/с, что на 50% выше, чем ранее были приняты рядом исследователей.

$$\dot{S}_{оп} = 1,5 \varepsilon \sqrt{\frac{AD}{18\mu}} h_0 \quad (1)$$

где $\dot{S}_{оп}$ - оптимальная скорость движения ползуна ;
 ε - относительная скорость деформации ;
 D - модуль упрочнения металла ;
 A - скорость релаксации металла ;
 μ - вязкость деформируемого металла ;
 h_0 - первоначальная высота осаживаемой заготовки ;

При оптимизации параметров гидропривода были построены кривые переходных процессов в системе привода для реальных винтовых прессов (с фрикционным приводом мод. ФА-124, электрическим мод. ФБ-1732, гидравлическим мод. ФА-2732А), при одной и той же кинетической энергии машины 100 кДж. Оценки качества переходного процесса в системе привода винтовых прессов определялось по величине отклонения системы по скорости, $\delta_v(t)$, представляющая собой разность выходной конечной скорости (в период разгона) исследуемой системы и эталонной линейной системы $\dot{S}_{эт}$, при обработке типового входного сигнала в виде единичной функции $I(t)$

$$\delta_v(t) = \frac{\dot{S}_{эт} - \dot{S}_\omega}{\dot{S}_{эт}} 100\% \quad (2)$$

За эталонную скорость ползуна в момент удара принята скорость, когда в системе привода отсутствуют потери энергии, т.е. при идеальном приводе.

Отклонение системы по скорости от эталонной : гидравлический привод составляет 6%, электрический (дугостаторный) до 66%, а фрикционный до 82%, при одном и том же значении времени разгона. Поэтому наиболее перспективным приводом можно считать гидравлический (имеющий в системе привода газогидравлический аккумулятор, который обеспечивает высокое быстродействие системы), особенно целесообразен гидропривод для мощных винтовых прессов усилием 10 МН и более, так как другие типы приводов менее экономичны, имеют низкий КПД и ряд других конструктивных и эксплуатационных недостатков. Это подтверждается исследованиями ряда авторов : А. И. Зиминым, Ю. А. Вочаровым, Ю. А. Зиминим, А. В. Сафоновым, Ю. Д. Морозовым и др. авторами.

Для составления математической модели привода винтовых прессов с гидроприводом была рассмотрена динамика гидро и пневмосистем

этих машин, которая учитывала динамические свойства звеньев этой системы (баллона с газом, трубопровода с газом и жидкостью, газо-гидравлического аккумулятора и других звеньев). В результате были получены дифференциальные уравнения движения рабочих частей винтового пресса с учетом колебаний давления жидкости в рабочем трубопроводе, переменного давления газа в аккумуляторе, работы сжатия жидкости и других параметров.

Линеаризованное дифференциальное уравнение движения рабочих частей пресса в период разгона при переменном давлении газа в аккумуляторе имеет вид

$$a_1 \frac{d\dot{S}}{dt} + b_1 \dot{S} + K\dot{S}t = c \quad (3)$$

Решение

$$\dot{S} = \frac{c_1}{a_1} e^{-[\frac{b_1}{a_1}t + \frac{K}{a_1}t^2]} \int_0^t e^{-[\frac{b_1}{a_1}t + \frac{K}{a_1}t^2]} dt \quad (4)$$

начальные условия $t=0$; $\dot{S}=0$; $c_1 = I(t)$.

При колебании давления жидкости в рабочем трубопроводе и переменном давлении газа в аккумуляторе линеаризованное дифференциальное уравнение имеет вид

$$a_1 \frac{d\dot{S}}{dt} + b_1 \dot{S} + K\dot{S}t = c_0 + s_1 p_0 [1 - e^{-\delta t} (\cos \lambda t + \frac{\gamma}{\lambda} \sin \lambda t)] \quad (5)$$

Решение

$$\dot{S} = \frac{c_1}{a_1} e^{-[\frac{b_1}{a_1}t + \frac{K}{a_1}t^2]} \int_0^t \left[\frac{c_0}{a_1} + \frac{s_1 p_0}{a_1} [1 - e^{-\delta t} (\cos \lambda t + \frac{\gamma}{\lambda} \sin \lambda t)] \right] \times e^{-[\frac{b_1}{a_1}t + \frac{K}{a_1}t^2]} dt \quad (6)$$

начальные условия $t=0$; $\dot{S}=0$,

где a_1 - коэффициент, учитывающий величину приведенной массы рабочих частей и жидкости;

b_1 - коэффициент, учитывающий приведенные гидравлические сопротивления в напорных и сливных трубопроводах;

- C_1 и C_0 - коэффициент, учитывающий величину активных сил и сил сопротивления в приводе ;
 K - коэффициент, учитывающий потери напора газа в газовой магистрали ;
 S_1 - площадь рабочего цилиндра ;
 P_0 - первоначальное давление жидкости в аккумуляторе ;
 γ - коэффициент затухания переходного процесса ;
 λ - частота затухающих колебаний.

Полученные уравнения, движения рабочих частей с учетом динамических свойств звеньев системы, позволяет рассматривать движение подачу пресса с учетом времени запаздывания сигнала управления и при различных законах управления машиной, а также более просто оптимизировать параметры отдельных звеньев системы привода.

В результате проведенной работы были оптимизированы (с использованием критерия оптимизации в виде абсолютного интегрального отклонения переходных функций реального и идеального приводов) такие важные параметры: как время разгона, сумма активных сил и сил сопротивления, величина гидравлических сопротивлений, масса рабочих частей и жидкости.

$$t_{p(оп)} = \frac{a_1}{C_1} \sqrt{\frac{C_1 - 3K_2 a_1^2}{a_1 \theta_1}}, \quad (7)$$

где $t_p(оп)$ - оптимальное время разгона рабочих частей пресса;
 K_2 - коэффициент усиления сигнала (в эталонном приводе).

$$C_{1(оп)} = \frac{3a^2}{4\theta_1^2 t_{p(оп)}^2} \quad (8) \quad \theta_{1(оп)} = \frac{15a^2}{\theta C_1 t_{p(оп)}^2} \quad (9)$$

$$a_{1(оп)} = t_{p(оп)} \sqrt{\frac{2C_1 \theta_1}{3}} \quad (10)$$

Полученные оптимальные параметры гидропривода позволяют проектировщикам выбрать наиболее рациональные параметры гидро- и пневмосистемы, обеспечивающие минимум потерь энергии в самом приводе и максимальное быстродействие системы управления винтовыми прессами с гидроприводом.

В третьей главе изложены методы анализа и основные свойства объекта регулирования, а также аналитические методы определения параметров, эффективно влияющих на энергию удара винтовых прессов с гидроприводом и пригодных для построения системы точного до-

зирования и регулирования энергии удара этого оборудования.

Анализ работы систем дозирования и регулирования ее элементов проведен для двух состояний: статического и динамического. При известном регулируемом объекте (винтовая машина плюс гидропривод) статический расчет позволяет определить параметры элементов регулятора, которые определяют его конструктивные показатели, обеспечивающие заданную неравномерность скоростей движения рабочих частей пресса и диапазон работы.

Динамический анализ позволяет исследовать переходной процесс в системе гидропривода. Основными задачами динамического анализа явилась оценка систем дозирования и регулирования на устойчивость, с выявлением качественных показателей переходного процесса (времени переходного процесса, максимального отклонения регулируемой величины от заданного значения, колебательность процесса и т. д.).

В результате динамического анализа установлено, что винтовой пресс с гидроприводом имеет положительный коэффициент самовыравнивания и обладает свойствами устойчивого объекта регулирования

$$\left(\frac{dP_c}{d\dot{\omega}} - \frac{dP_g}{d\dot{\omega}} \right) > 0.$$

где P_g и P_c - приведенные силы движущие и силы сопротивления соответственно. Для определения максимального отклонения регулируемой величины - скорости рабочих частей от заданных (номинальных) значений было получено линеаризованное уравнение движения ползуна пресса, в приращениях при работе объекта регулирования в автоматическом и неавтоматическом режимах работы. Затем уравнение было записано в операторной форме.

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{(\tau_P + 1)} (K_P \Delta P - K_{gP}^P \Delta \xi_{gP}^P + K_{Vg} \Delta V_g - K_{gP}^{c\lambda} \Delta \xi_g^{c\lambda} - K_\Phi \Delta \Phi), \quad (11)$$

где $\frac{d}{dt} = P$ - оператор дифференцирования;
 τ - постоянная времени объекта регулирования;
 K - коэффициенты усиления сигналов

по параметрам: давлению, сопротивлению гидравлических дросселей, установленных в напорном и сливном трубопроводах, по объему газа в аккумуляторах, по внешнему возмущающему воздействию соответственно, ΔP , $\Delta \xi_{gP}^P$, $\Delta \xi_g^{c\lambda}$, $\Delta \Phi$, ΔV_g

- приращения соответствующих входных сигналов управления к номинальным (расчетным) значениям.

Используя полученные теоретические зависимости, были определены изменения величины скорости рабочих частей винтовой опытно-промышленной машины усилием 0,4 МН при отклонении параметров управления на 1/6 от номинального значения.

Расчеты показали, что наиболее эффективно влияют на скорость винтовой машины отклонения таких параметров, как давление в аккумуляторе, объем газа в баллонах аккумулятора и ход разгона. Это полностью подтверждается и экспериментальными данными.

В работе дана оценка влияния малых отклонений параметров системы управления на переходную функцию объекта управления посредством функции чувствительности. Наибольшую чувствительность система управления имеет к отклонению величины движущих сил и времени хода разгона рабочих частей винтового пресса. Для определения эффективных параметров управления винтовыми прессами рассмотрен оптимальный переходный процесс, т.е. такой процесс, когда энергия, необходимая для перевода системы из одного состояния в другое, была минимальной. Управляющие функции объекта регулирования выбраны из условия минимального времени разгона. При управлении процессом, оптимальным по быстродействию, рассмотрен процесс регулирования и дозирования кинетической энергии без перерегулирования, т.е. такое управление, когда энергия жидкости, запасенная объектом полностью соответствовала расчетной кинетической энергии. Оптимальное время разгона и необходимый объемный расход жидкости, проходящей через регулятор (клапан или золотник), определялись из условия достижения рабочими частями винтовой машины значения скорости 0,4...0,6 от установившегося значения, после этого, управление прессом отключалось.

Для обеспечения оптимального значения объекта регулирования был выведен алгоритм (закон) управления, который определяет зависимость между величиной открытия золотника или клапана и временем хода разгона

$$\alpha = \frac{1,73 K_1 f_1 a_1 t_p \sqrt{a_1 t_p}}{M \pi a_{30n} \sqrt{\frac{c_1 t_p}{\alpha_1} - \dot{s}_0(t)}}, \quad (12)$$

где α - смещение плунжера золотника относительно расчетных кромок;

K_1 - коэффициент;

f_1 - площадь поперечного сечения напорного трубопровода;

t_p - время хода разгона;

Анализ показывает, что открытие золотника или клапана по ходу разгона должно проходить ускоренно, если время их включения равно времени хода разгона машины.

При $t_{вкл} \leq 0,25 t_p$ открытие золотника может быть равномерным по времени. Поэтому при $t_{вкл} > t_p$ управление золотником или клапаном должно осуществляться от гидрогидравлического аккумулятора, обеспечивающего ускоренное открытие регулирующих устройств.

При $t_{вкл} \leq 0,25 < t_p$ управление золотником или клапаном может производиться от насоса постоянной производительности.

• В четвертой главе изложены экспериментальные исследования параметров винтовых прессов эффективно влияющих на энергию удара и новых разработанных систем регулирования энергии удара.

В этом разделе изложена методика экспериментального определения стабильности удара винтовых машин, которая включает в себя:

- определение целесообразности применения тех или иных регулирующих параметров при исследовании ;
- определение фактических значений отклонений образцов (крешеров) по высоте при различных входных параметрах;
- сравнение стабильности удара при различных входных параметрах.

При исследовании были использованы медные или стальные образцы (крешеры).

Стабильность удара оценивалась по величине максимально допустимой погрешности отклонения крешера по высоте при тех или иных регулируемых входных параметрах. Эксперименты проводились в 80-83 г. в НИИ гидровинтовых машин КуИСИ им. Микояна на винтовом прессе с гидроприводом усилием 0,4 МН и в последующем в 90-94 г. в НИИде, АНТЦ и АВИТИ на промышленных винтовых прессах с электрическим и гидравлическим приводами усилием 10,16 и 25 МН.

Скорость ползуна винтовой машины в момент удара замерялась в цифровой форме с помощью специального устройства модели ИМС-1 разработанного в лаборатории гидровинтовых машин КуИСИ им. Микояна. Устройство состоит из первичного датчика, линии связи, вторичного прибора с частотометром. В качестве первичного датчика скорости использовался тахогенератор ТГМ 30/П, с возбуждением от постоянного магнита, вал которого через пару винт-гайка соединялся непосредственно с ползуном пресса. Экспериментальное исследование стабильности винтового пресса с гидроприводом проводились в два этапа. В первом этапе определялся доверительный интервал отклоне-

ний высот образцов (крешеров) при их осадке на экспериментальных и промышленных моделях винтовых прессов при различных входных параметрах управления (давлении и ходе разгона). Эти эксперименты проводились с целью определения группы и класса точности штамповок лопаток ГТД, получаемых на винтовых прессах с гидроприводом (по величине отклонений высот образцов после осадки и сравнении их с установленными допусками). Анализ экспериментальных данных показывает, что доверительный интервал отклонений высот соответствует допускам по высоте второго и третьего класса точности штамповок лопаток ГТД по ОСТ 1.41717-78. Во втором этапе определялся (расчитывался) доверительный интервал отклонений таких выходных параметров как скорость ползуна в момент удара и полезная работа деформирования образца (крешера) при различных входных параметрах.

По этим данным определялась точность и эффективность разработанной системы дозирования энергии удара по скорости.

Средние опытные значения отклонений по скорости составляют $\pm 3,85\%$, а по полезной работе деформирования $\pm 6,74\%$, такая точность достаточна для точной штамповки лопаток ГТД.

Экспериментально исследовались системы дозирования энергии удара по скорости и система бесступенчатого регулирования энергии с оригинальным устройством аккумулятором-мультипликатором по собственному а. с. 829450.

Исследования показали, что газогидравлический аккумулятор-мультипликатор обеспечивает повышение давления в рабочем цилиндре в 3,6 раза по сравнению с давлением, развиваемым насосом, плавное и бесступенчатое регулирование давления в диапазоне от 10 до 100%, а соответственно и энергии удара винтовой машины. В дальнейшем, при рабочем проектировании промышленных образцов винтовых прессов усилием 10, 16 и 25 МН использовался этот эффект.

Экспериментально исследовано влияние отдельных параметров гидропривода на скорость движения рабочих частей винтового пресса с определением его оптимума. При этом был разработан метод определения скоростей и ускорений винтовых машин при записи параметров струнным ходографом, обеспечивающим погрешность до 6,5%. Обработка данных проводилась с применением ЭВМ. Метод определения скоростей и ускорений заключается в математической обработке результатов опытов, путем подбора математических зависимостей к кривой перемещения ползуна в функции времени разгона, записанной на бумагу или пленку светолучевым осциллографом; определение коэффициентов, входящих в

это уравнение, оценка точности расчета коэффициентов и затем вычисление скорости и ускорения ползуна в функции времени или перемещения методом дифференцирования. В разработке метода принимали участие канд. техн. наук В. Е. Пашин.

Экспериментальные данные подтвердили, что существенное влияние на скорость и энергию удара оказывают такие параметры, как давление жидкости в аккумуляторе, ход разгона, объем газа в баллонах аккумулятора. Эти параметры могут быть использованы при построении систем точного дозирования и регулирования энергии удара. Для определения оптимума скорости движения рабочих частей пресса с гидроприводом при варьировании различными входными параметрами (давлением в аккумуляторе, ходом разгона, моментом инерции рабочих частей, сопротивлением в напорных и сливных трубопроводах) был использован метод планирования эксперимента - метод крутого восхождения (метод Бокса-Уилсона). В результате была получена математическая модель дробно-факторного эксперимента имеющая вид

$$\dot{S} = 0,72 + 0,054 P_0 - 0,067 J_u + 0,017 S_p + 0,029 V_g - 0,016 \xi_p - (13) \\ - 0,0075 \xi_{cl}$$

где P_0 - давление в аккумуляторе;

J_u - момент инерции рабочих частей;

S_p - ход разгона;

V_g - объем газа в баллонах аккумулятора;

ξ_p и ξ_{cl} - коэффициенты учитывающие сопротивление в рабочей и сливной магистралях.

Входящие в это уравнение весовые коэффициенты при варьируемых параметрах указывает на то, что для достижения оптимума скорости рабочих частей (с минимальными потерями энергии) целесообразно уменьшать сопротивление в напорной и сливной магистралях.

Анализ результатов теоретического и экспериментального исследования показал, что расчет выходного параметра - скорости ползуна винтового пресса с гидроприводом можно вести по формулам учитывающим линеаризацию гидравлических потерь движения жидкости в трубопроводах. Скорости ползуна рассчитанные по этим формулам имеют отклонения от опытных значений со знаком плюс от 2,5 до 4,5% и со знаком минус от 4,8 до 15%, что достаточно для инженерных расчетов.

На основании теоретических и экспериментальных исследований и с учетом особенности технологии штамповки лопаток ГТД была разработана методика инженерного расчета новых специализированных и



усовершенствованных винтовых прессов для точной штамповки лопаток ГТД, которая позволяет определить кинематические параметры пресса: ход разгона, скорость и ускорение ползуна в момент удара, конструктивные параметры (размеры маховика, винта, диаметры цилиндров, аккумулятора, напорных и сливных трубопроводов, размеры клапанов, емкость маслобака); энергетические (энергия удара, мощность эл. двигателя главного привода с учетом оптимальности габаритов, размеров привода, системы управления и рабочих давлений в системе).

В пятой главе изложена методика инженерного расчета винтовых прессов с гидроприводом усилием 1,6 - 40 МН (с приводными гидроцилиндрами).

Теория расчета винтовых прессов с гидроприводом разработана в МТУ им. Баумана проф. Зиминным и проф. Ю. А. Бочаровым.

Отличительной особенностью работы винтового пресса с гидроприводом является то, что штамповка лопаток ГТД производится за счет двух видов энергий: гидравлической, заключенной в рабочем цилиндре и кинетической энергии удара подвижных частей (ползуна, винта, маховика) накопленной в период хода разгона.

Данная методика опробована при создании новых специализированных винтовых прессов усилием до 16 МН и при модернизации прессов усилием до 8 МН.

При расчете основных размеров и параметров узлов специализированного пресса и его гидропривода рекомендуется использовать следующие данные (изложенные в ГОСТе 713-81 "Прессы винтовые. Основные параметры и размеры").):

P_n - номинальное усилие, МН;

$P_{дс}$ - допускаемое усилие, МН;

T_d - эффективная номинальная энергия удара, кДж;

S - наибольший ход ползуна, мм;

S_1 - ход ползуна (ход разгона) при номинальной эффективной энергии мм.;

n - число двойных ходов при наибольшем ходе, ход/мин

Методика состоит из 3-х разделов:

- расчет основных размеров и параметров базовых узлов пресса;
- расчет основных параметров гидропривода (насосно-аккумуляторного);
- расчет кинематических параметров пресса.

В расчет основных размеров и параметров базовых узлов пресса входит: определение размеров рабочего гидроцилиндра (внутренний и наружный диаметры, длина, ход штока); габаритов и массы ползуна; момента инерции и размеров маховика; размер в винта (шпинделя) - внутренний, наружный диаметры, длина; размеров гайки (наружный диаметр, высота); расчет фрикционного предохранителя (площадь поверхности трения, количество пружин для затяжки предохранителя, удельного усилия затяжки); габаритов станины (верхней поперечины с отверстием под гайку, стяжные болты, стол, стойки).

Расчет габаритов и параметров базовых узлов пресса производить с учетом действующих усилий в винтовом механизме, станине пресса и с использованием исходных данных по ГОСТ 713-81.

Расчет гидропривода пресса проводится с учетом динамики переходных процессов, происходящих в приводе в период хода разгона, торможения и хода вверх ползуна. Определяется производительность насоса; габариты бака для жидкости и уровень жидкости; диаметры напорного и сливного трубопроводов, причем допустимые скорости в трубопроводах приняты 20-25 м/с соответственно, а для воздушного трубопровода до 70 м/с; температура жидкости в баке; объем жидкости и газовой полости аккумулятора, при этом принимается объем газа в аккумуляторе равным 4-5 объемам жидкости.

Определение кинематических параметров: $\dot{S}(t)$ - скорости ползуна, $S(t)$ - перемещение ползуна, t_p - время разгона производится по формулам (4), (6), (7).

Оптимальная скорость ползуна определяется в пределах

$$\dot{S} \geq \dot{S}_{\text{макс}} \cdot \sqrt{\frac{2T_9}{M}} \leq \dot{S}_{\text{оп}} \text{ М/с} \quad (14)$$

В шестой главе изложены основы теории колебания фундаментов и методика инженерного расчета фундамента под установкой мощных винтовых прессов усилием 10 МН и более.

Отличительной особенностью работы вертикальных винтовых прессов является передача на фундамент, кроме вертикальных динамических нагрузок (подобно молотам) и дополнительно динамического крутящего момента. Опыт эксплуатации фундаментов под винтовые прессы, спроектированные без учета крутящего момента, показал, что в ряде машиностроительных предприятий (г. Москвы, Омска и др.) наблюдались значительные деформации фундаментов, а на некоторых

предприятиях отрасли (г. Балашиха Московской области, г. Самары) вследствие неправильно спроектированного фундамента происходили и деформации станины пресса.

В данном разделе работы рассмотрены вопросы теоретического и экспериментального исследования системы "пресс-фундамент-грунт"; классификация усилий, передаваемых на фундамент, на основе которой разработана методика инженерного расчета основных параметров фундамента (площади подошвы, глубины заложения, массы, момента инерции) с учетом динамического крутящего момента и нагрузок, передаваемых на фундамент.

Определение динамических нагрузок, передаваемых на фундамент, рассматривались с учетом колебаний фундамента и станины пресса. При этом часть фундамента на глубину приема для выталкивателя считалась упругой с определенной жесткостью.

В этом случае расчетная схема системы "Пресс-фундамент-грунт" сводится к системе трех тел:

- подвижных частей, являющихся ударным телом;
- станины пресса, отделенной от фундамента упругим звеном;
- фундамента на упругом основании.

Методика инженерного расчета фундамента.

1. Площадь подошвы фундамента без учета боковой засыпки (первое приближение)

$$F_{\phi} \geq \sqrt[3]{\frac{72(1+K_v)^2 g^2 J_0^2 \dot{s}^2(t) \sin \varphi}{A_g^2 h^2 c_t \rho H}}, \quad (15)$$

где H - глубина заложения фундамента;

K_v - коэффициент восстановления скорости (принимается равным 0,25);

h - ход винтовой линии рабочей винтовой пары;

φ - меньший угол между диагоналями подошвы фундамента (при квадратной подошве $\varphi = 90^\circ$ и $\sin \varphi = 1$);

J_0 - момент инерции вращающихся частей пресса;

c_t - коэффициент упругого сжатия грунта по СНиП II-15-79 (в зависимости от типа грунта);

ρ - плотность материала фундамента;

A_g - допустимая амплитуда колебаний фундамента (принимается равной 0,25 мм).

2. Площадь подошвы фундамента с учетом боковой засыпки
(второе приближение)

$$F_{\phi} \geq \sqrt[3]{\frac{72(1+K_{\delta})^2 \gamma_c^2 \gamma_0^2 S^2(t) \sin \varphi}{A_0^2 h^2 (1+K_{\delta 5}) c_t \rho H}} \quad (16)$$

где K_{δ} - геометрический коэффициент влияния боковой засыпки.

3. Масса конструкции фундамента

$$m_{\phi} = m_{\delta} + m_{ap} \quad (17)$$

где m_{δ} - масса бетона (по габаритам фундамента);

m_{ap} - масса арматуры (по чертежу).

Верхняя часть фундамента принимается по размерам подошвы станины пресса (согласно строительного задания)

Проверочный расчет фундамента

Проверяются размеры подошвы фундамента по среднему статическому давлению на грунт

$$p_p \leq m R^H \quad (18)$$

где R_{ϕ} - среднее удельное давление на основание подошвы фундамента от нормативных статических нагрузок;

m - коэффициент условий работы (0,4 ... 1,0), для кузнечных молотов 0,4;

R^H - нормативное удельное давление на основание, в соответствии с СНиП II-15-79 п. п. 3.50-3.52.

4. Проверка фундамента на колебание

- 4.1. Амплитуда вертикальных колебаний

$$A_z = \frac{(1+K) m_0 \dot{S}(t)}{(m_0 + M) \sqrt{\frac{K_{\phi} + K_{\delta 5}}{M}}} \leq 0,25 \quad (19)$$

где M - масса фундамента, грунта на его обрезках и станины.

- 4.2. Амплитуда вращательных колебаний угловых точек верхнего обреза фундамента

$$A_{\psi} = \frac{\sqrt{2} \gamma_c (1+K) \gamma_0 \dot{S}(t) \sqrt{F}}{(\gamma_0 + \gamma) h \sqrt{\sin \varphi} \sqrt{\frac{K_{\phi} + K_{\delta 5}}{\gamma}}} \leq 0,25 \quad (20)$$

где $K_{\psi} = C_{\psi} J_0$ - жесткость основания на кручение;

J_0 - полярный момент инерции площади подошвы фундамента.

Материалы инженерного расчета фундаментов под винтовые прессы были использованы при составлении новой редакции СНиП -19-79 фундаменты машин с динамическими нагрузками, в котором учтены колебания фундамента от действия крутящего момента.

Теоретические расчеты были проверены на опытно-промышленном прессе с гидроприводом в лаборатории гидровинтовых машин КуИСИ им. Микояна в 1980-85 г. и показали хорошую сходимость результатов теоретического и экспериментального исследований. По данной методике были рассчитаны фундаменты, а затем смонтированы и установлены на промышленных предприятиях в г. Балашихе, Ташкенте, Н. Новгороде, Самаре тяжелые винтовые прессы усилием 10,16 и 25 МН и показали надежную работу. В разработке методики принимал участие инженер В. Д. Стародубцев.

В седьмой главе изложены результаты разработки новой конструкции специализированного и усовершенствованных винтовых прессов усилием 2,5...40 МН для точной и малоотходной штамповки лопаток ГТД и рекомендации по выбору оптимальной энергии удара.

Конструкции новых специализированных и усовершенствованных винтовых прессов усилием 2,5...40 МН разрабатывались под руководством автора диссертации в соответствии с разделом РТМ отрасли "Оборудование" комплексного и типового технологического процессами изготовления одной и двух замковых лопаток компрессора ГТД длиной пера до 350 мм из титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ9, ВТ18У, ВТ25, ВТ30, ВТ33 и из коррозионно стойких жаропрочных сталей ЭИ961Ш, ЭИ736Ш, ЭП517Ш, ЭП866Ш, ЭИ437Б (схема N5), а также разработанного НИА-Том норм допусков и припусков на лопатки по ОСТ 1.41717-78.

Разработанный технологический процесс предусматривает штамповку лопаток в два перехода: предварительный и окончательный.

После штамповки производится правка и точная калибровка заготовок лопаток в открытых штампах.

Фасонная заготовка лопаток изготавливается методом выдавливания заготовок в горячем состоянии в разъемных матрицах на специализированных винтовых прессах с повышенной в 3...4 энергией удара. Специализированный винтовой пресс усилием 4 МН был разработан, изготовлен и находился в эксплуатации более 10 лет на одном из заводов отрасли и показал надежную работу. Пресс был предназначен для выполнения операции выдавливания фасонных заготовок лопаток ГТД в

горячем состоянии при температуре 950...1200 °С из материалов ЖС6-КП, ЭИ961, ВТ8 и др. Принципиальная схема пресса защищена а. с. N 115712. При разработке были использованы а. с. N281156; N356035; N366093.

Особенности пресса:

- кинетическая энергия в 4 раза больше, чем у универсального пресса того же номинального усилия;
- оборудован встроенным блок-штампом с нагревом до 300...350 °С;
- нет маховика, его роль выполняет рабочий цилиндр;
- резьба винта (шпинделя) находится в масле под давлением до 14 МПа.

Специализированный пресс позволяет сократить типаж применяемых кузнечных машин (например, исключить электровысадочный автомат), повысить КИМ в 2-3 раза.

За период с 1970 по 1995 г. разработано 14 проектов модернизации винтовых прессов отечественного и импортного производства, позволяющие повысить технико-экономические показатели данного оборудования. Ряд проектов внедрено на заводах отрасли и позволило получить на них лопатки ГТД с уменьшенными припусками. Модернизация прессов заключалась в новых технических решениях с использованием собственного а. с. N174945.

Первое направление модернизации-замена фрикционного привода гидравлическим, как наиболее перспективного привода для винтовых прессов усилием 2,5...8,0 МН.

Второе направление модернизации-оснащение пресса с гидроприводом импортного производства системами точного дозирования энергии удара по скорости, адаптивными системами управления по температуре заготовки, устройствами предохранения прессов от перегрузки (предохранительные фрикционные муфты); создание группового гидропривода, устройства для автоматической закачки сжатого газа в аккумулятор и т. д.

Разработанная адаптивная система управления винтовым прессом усилием 23 МН предназначена для автоматического регулирования энергии удара (уменьшения или увеличения ее) в зависимости от температуры заготовки в рабочей зоне пресса, повышения в 2 раза стабильности удара, регистрации в цифровой форме максимальных значений скорости ползуна (в заданном диапазоне) и записи скорости ползуна и температуры заготовки на бумаге.

Оснащение винтовых прессов адаптивной системой управления

позволяет освоить технологию точной штамповки лопаток двигателей с припуском по перу от 0,3 до 0,5 мм на сторону.

Разработанная система управления может быть применена для управления винтовыми прессами и с прямым электрическим приводом моделей PSS 360, 400 и 460 усилием 10,16 и 23 МН (производства Германии).

В этой главе разработаны также рекомендации по выбору оптимальной энергии удара винтовых прессов с различными типами приводов.

Для получения точных и качественных штамповок лопаток, кронштейнов, штурцов, дисков и др. ответственных деталей ГТД необходимо точно определить энергию удара винтовых прессов, а затем настроить пресс на эту величину энергии. При выполнении этого условия после точной калибровки в открытых штампах можно получить лопатки ГТД с припуском по перу от 0,02 до 0,05 мм. На предприятиях отрасли для обеспечения гарантированного смыкания штампов при точной штамповке, энергию удара пресса обычно увеличивают на 10-15%, что снижает долговечность дорогостоящего оборудования и стойкость сложной штамповой оснастки (штамповых вставок). Для определения оптимальной энергии удара пресса были проведены исследования, на основе которых разработана методика, позволяющая вычислить эффективную энергию удара тяжелых винтовых прессов с учетом упругой деформации пресса и оснастки без избытка энергии.

В восьмой главе рассмотрены вопросы экономической эффективности и практической ценности от освоения авиационной отраслью специализированных винтовых прессов. В работе приведены пять мощностростроительных предприятий отрасли в г. Уфе, Запорожье, Рыбинске, Перми, Казани, на которых освоена технология штамповки комплексных лопаток ГТД длиной до 350 мм с припуском после штамповки 0,2... 0,3 мм, а после точной калибровки от 0,02 до 0,05 мм на усовершенствованных винтовых прессах. Экономическая эффективность данного оборудования складывается от штамповки лопаток с уменьшенными припусками и повышения долговечности базовых узлов пресса (станины, пары винт-гайка, ползуна). Так внедрение на ряде предприятий отрасли комплексных технологических процессов и нового специализированного оборудования для точной штамповки лопаток ГТД в развитии отраслевой целевой программы "Лопатка" позволяет: повысить механические свойства заготовки на 10 - 15 %; - стабилизировать качество; - повысить технический уровень производства; - обеспечить по-

вышение КИМ до 0,6 (т.е. в 2 - 3 раза) - снизить трудоемкость изготовления на 40...60%; - уменьшить объем ручных доводочных работ на 50...70%; - повысить точность штамповки на один класс.

Оснащение прессов системы и точного дозирования и регулирования энергии удара и адаптивной системой управления позволяет сократить размерный ряд штамповочных машин, повысить на 15...18% долговечность базовых узлов пресса и штамповой оснастки.

В приложении изложены результаты обработки измерений после осадки на винтовых прессах высоты медных и стальных образцов показывающих на высокую стабильность удара винтовых прессов с гидроприводом при регулировании энергии удара по скорости ползуна. Отклонение скорости ползуна от среднего значения составляет $\pm 3,85\%$, что указывает на высокую стабильность удара винтовых прессов с гидроприводом.

Основные выводы и результаты работы.

1. Решена крупная научно-техническая проблема в заготовительно-штамповочном производстве основных машиностроительных отраслей народного хозяйства, повышение прочностных свойств и КИМа титановых сплавов и коррозионностойких жаропрочных сталей одно и двух-завихровых лопаток ГТД, за счет освоения на специализированных винтовых прессах штампованных лопаток с уменьшенными припусками. В результате достигнут припуск по перу лопатки на сторону после штамповки в открытых штампах 0,2... 0,3 мм, а после точной калибровки в штампах припуск составляет 0,02... 0,05 мм под абразивно-жидкостное полирование. Это исключает последующую механическую обработку (фрезерование и шлифование пера лопаток).

Решение данной актуальной проблемы соответствует направлению работ по комплексной целевой отраслевой программе "Лопатка", разработанной в НПО Повожского АВТИ и являющаяся логическим продолжением и развитием работ, выполняемых научной школой профессора Зимина А.И. в МГТУ им. Баумана по разработке теории и совершенствованию конструкции винтовых кузнечных машин.

2. Разработаны научные основы совершенствования конструкции, систем привода и управления винтовыми прессами усилием до 40 МН для штамповки лопаток ГТД длиной до 350 мм, с использованием теории оптимизации. В результате выполненных с 1990 по 1995г. двадцать пять НИР и ОКР разработаны новые конструкции системы привода и управления прессами, решены многие проблемы их расчета и конструирования, включая фундаменты.

3. Проведен анализ и составлена классификация систем управления винтовыми прессами по шести наиболее существенным признакам (способу регулирования энергии, принципу работы, характеру задающего воздействия, характеру управления, виду энергии и числу контуров) используя которую, любую новую систему управления можно оценить на перспективность и отнести ее к тому или иному классу систем.

4. Разработаны аналитические методы определения эффективных типов приводов винтовых прессов (работающих в дискретном режиме), которые позволяют по величине отклонения выходного параметра системы (скорости ползуна) от эталонного значения, определить наиболее перспективный тип привода для этого вида оборудования.

Так из трех известных типов привода (фрикционного, электрического и гидравлического) наиболее перспективным является гидравлический, обеспечивающий в 5-10 раз меньшие отклонения системы от эталонной скорости, чем другие приводы, обеспечивает большее КПД установки (особенно мощных винтовых машин усилием более 10 МН) и быстродействие.

5. Разработанные методы оптимизации параметров гидропривода винтовых прессов по величине абсолютного интегрального отклонения (функционалу качества переходного процесса), которые позволили определить оптимальные значения активных сил и сил сопротивления привода, гидравлических сопротивлений, массы рабочих частей пресса и массы жидкости в трубопроводах.

Проектирование привода с оптимальными параметрами обеспечивает минимальные потери энергии в самом приводе и максимальное быстродействие системы управления.

6. Разработаны аналитические методы составления и решения нелинейных дифференциальных уравнений методом линеаризации (с применением ЭВМ) движения рабочих частей винтовых машин в период хода разгона (с использованием дифференциальных уравнений динамических звеньев пневмо и гидросистем пресса), которые позволяют оптимизировать отдельные узлы прессовой установки (например, объемы гидропневмоаккумулятора, газа в баллонах) и исследовать период хода разгона с учетом колебания жидкости в рабочем трубопроводе, переменного давления газа в аккумуляторе, работы сжатия жидкости и других параметров.

7. Определены эффективные скорости движения рабочих частей винтовых прессов, применительно к операции горячей осадки заготовок лопаток на 30 ... 50% больше ранее принятых значений.

Значение эффективных скоростей движения рабочих частей винтовых прессов определены из условия рассмотрения динамической модели сложного тела (в горячем состоянии) с учетом одновременно протекающих процессов упрочнения и релаксации напряжений в деформируемой заготовке.

8. Разработаны аналитические методы определения параметров, эффективно влияющих на энергию удара винтовых машин с гидроприводом с использованием методов статического и динамического анализа систем управления. Полученные по этим методам значения коэффициентов усиления сигналов по давлению, ход разгона, сопротивлению рабочего и сливного трубопроводов, объему газа в баллонах аккумулятора показывают, что существенное влияние на скорость движения рабочих частей оказывают те же параметры, как давление жидкости, ход разгона и объем газа в аккумуляторе. Эти параметры могут быть использованы в оптимальных системах управления винтовых прессов.

Вычисленные функции чувствительности, временной характеристики - переходной функции объекта управления (винтовая машина плюс гидропривод) подтверждают, что наибольшую чувствительность система имеет к отклонению движущихся сил привода.

9. Разработаны методы управления винтовыми прессами, оптимальными по быстродействию и выведены закономерности (алгоритмы) управления этими машинами. Установлено, что если время включения золотника или клапана равно времени хода разгона, то открытие этих регуляторов должно осуществляться ускоренно (по определенному закону).

Притвкл $\leq 0,25 t_p$ открытие золотника или клапана может осуществляться при постоянной скорости.

Установлено экспериментальное влияние различных параметров гидросистемы на стабильность удара пресса. Наибольшая стабильность удара обеспечивается регулированием эффективной энергии такими параметрами, как давление жидкости и газа.

В результате исследования, промышленных испытаний и эксплуатации установлено, что винтовые прессы с гидроприводом могут обеспечить точность штамповки лопаток ГТД не ниже 3-го класса точности по ОСТ 1.41717-78.

10. Разработана методика инженерного расчета и конструирования специализированных винтовых прессов и их приводов, а также фундаментов под их установку с использованием метода оптимизации параметров и размеров, позволяющих конструировать данное оборудование для промышленного использования. По данной методике разработано: проект нового специализированного винтового пресса для выдавливания фасонных заготовок лопаток в разъемных матрицах и 14 проектов усовершенствованных винтовых прессов усилием 1,6... 40 МН для точной штамповки лопаток ГТД.

11. Разработана методика экспериментального определения эффективной энергии удара винтовых прессов до 400 кДж по осадке одного медного образца (крешера). Погрешность определения эффективной энергии удара по этому методу составляет не более 8%, а при изготовлении образцов из одного прутка равно 0,8%.

Методика использована при испытании новых специализированных и усовершенствованных винтовых прессов усилием 1,6... 40 МН.

12. Разработана методика обработки экспериментальных данных (с применением ЭВМ), получаемых с датчика - струнного ходографа, обеспечивающая погрешность расчетов не более 6,5% при вычислении таких кинематических параметров, как перемещение, скорость и ускорение рабочих частей винтовой машины в период хода разгона.

13. Спроектированы и экспериментально исследованы: система дозирования энергии удара по скорости и адаптивная система управления по температуре заготовки. Точность дозирования энергии удара по скорости в 5...10 раз выше лутевой системы управления. Системы испытаны на винтовых прессах усилием 16 и 25 МН чехословацкого производства.

14. Выполнена разработка и экспериментально исследована новая система регулирования энергии удара с оригинальным устройством (по собственным а. с. 829450 и 948690) аккумулятором-мультипликатором, обеспечивающая плавное и бесступенчатое регулирование давления жидкости в рабочем цилиндре (соответственно и энергию удара) и ее мультипликацию в 3,6 раза по сравнению с номинальным давлением, развиваемым насосом (без увеличения установочной мощности эл. двигателя).

Данное устройство использовано при модернизации винтового пресса мод. LVH усилием 10 МН.

15. Составлены рекомендации по совершенствованию отдельных узлов, элементов гидропривода, систем управления гаммы винтовых

прессов усилием 4,0-25 МН, и по выбору оптимальной энергии удара в зависимости от требуемой работы деформирования и регулируемых параметров. Рекомендации в 1990 году переданы для внедрения Чимкентскому АО "КПО".

16. Внедрены на пяти моторостроительных предприятиях отрасли в г. г. Уфе, Казани, Рыбинске, Перми, Запорожье, разработанные типовые технологические процессы точной и малопрпусковой штамповки лопаток ГТД длиной до 350 мм с использованием усовершенствованных винтовых прессов, разработанных под руководством и непосредственным участии автора диссертации.

Так, в результате освоения технологии штамповки с уменьшенными припусками лопаток ГТД, повышаются механические свойства материала заготовок лопаток на 10...15%, КИМ увеличивается в 2-3 раза, долговечность базовых узлов пресса на 15...18%, снижается трудоемкость изготовления на 40...60%, объем ручных доводочных работ на 50...70%.

Основное содержание диссертации ... отражено в следующих работах:

1. Морогов В. М., Бочаров Ю. А. Экспериментальное исследование опытно-промышленного гидровинтового пресс-молота с внутренней резьбой винтового цилиндра // Кузнечно-штамповочное производство. - 1969, - №7, - С. 24-27.
2. Морогов В. М., Лебедев В. Ф., Корочкин Н. Е. Опытно-промышленный гидровинтовой пресс-молот усилием 40 тс // Машины и технология обработки давлением // Сб. МВТУ им. Н. Е. Баумана, серия Машиностроение. - 1969, - №9, - С. 36-43.
3. Морогов В. М., Гонченко Б. В., Константинов С. С. Модернизация винтового пресса усилием 250 тс мод. ФА127 // Кузнечно-штамповочное производство. - 1973, - №9, - С. 30-31.
4. Зимин Ю. А., Морогов В. М. Экспериментальное исследование гидровинтовых пресс-молотов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1974, - №6, - С. 30-34.
5. Кричке В. О., Морогов В. М., Гонченко Б. В. Информационная система контроля работы гидровинтовых пресс-молотов // Механизация и автоматизация производства. - 1975, - №2, - С. 10-11.
6. Морогов В. М., Фарманова В. Н. Применение гидровинтовых прессов-молотов для штамповки полиуретаном // Кузнечно-штамповочное производство. - 1975, - №3, - С. 35-36.

7. Морогов В. М. Дозирование и регулирование энергии удара винтовых прессов // Кузнечно - штамповочное производство. - 1975. - №. - С. 34-35.

8. Морогов В. М. Об экспериментальном определении эффективной энергии кузнечно-штамповочных машин при помощи медных образцов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1976. - №2. - С. 36-38.

9. Морогов В. М., Бочаров Ю. А. Модернизация винтовых прессов. Куйбышев: книжное издательство, 1977. - С. 126.

10. Морогов В. М. Оптимизация параметров винтовых прессов // Совершенствование кузнечно-штамповочного оборудования ударного действия: Тез. докл. Республиканской конф. - Ижевск, 1979. - С. 11-12.

11. Морогов В. М. Определение кинематических параметров винтовых прессов с использованием линеаризованных уравнений // Вестник машиностроения. - 1982. - №11. - С. 61.

12. Морогов В. М. Система регулирования энергии удара пресс-молота для точной и малоотходной штамповки лопаток ГТД // Авиационная промышленность. - 1986. - №3. - С. 25-27.

13. Морогов В. М., Фарманова В. Н., Стародубцев В. Д.

Модернизация гидровинтовых пресс-молотов мод. 02732 А. усил. 1,6 МН // Кузнечно-штамповочное производство. - 1987. - №6. - С. 38-40.

14. Морогов В. М., Стародубцев В. Д. Выбор тяжелых механических прессов для точной и малоотходной штамповки лопаток ГТД // Авиационная промышленность. - 1987. - №7. - С. 18-20.

15. Морогов В. М., Стародубцев В. Д. Модернизация тяжелых винтовых прессов для точной штамповки деталей ГТД // Авиационная промышленность. - 1987. - №8. - С. 18-20.

16. Морогов В. М., Стародубцев В. Д. Определение оптимальной энергии удара тяжелых винтовых прессов при точной штамповки деталей ГТД // Авиационная промышленность. - 1989. - №3. - С. 24-26.

17. Морогов В. М., Стародубцев В. Д. Точная и малоотходная штамповка лопаток ГТД на винтовых прессах // Авиационная промышленность. - 1989. - №5. - С. 17-20.

18. Морогов В. М. Проблема разработки и инженерные методы расчета и конструирования винтовых прессов и фундаментов под них для точной и малоотходной штамповки лопаток ГТД // Оборудование и процессы обработки давлением: Тез. докл. Всероссийской научнотехнической конференции "100-летие со дня рождения проф. А. И. Зимина", - М., 1995. - С. 61-66.

19. А.С. 174945, СССР, МКИ, 58 Винтовой пресс с гидроприводом /В.М.Морогов, Ю.А.Бочаров, А.В.Сафонов // Открытия, изобретения... -1965- N18.

20. А.С. 281156, СССР, МКИ, В30В Гидравлический винтовой пресс / В.М.Морогов, А.И.Зимин, Ю.А.Зимин и др. //Открытия, изобретения ... -1970. - N 28.

21. А.С. 366093, СССР, МКИ, В30В 1/18В31 7/28 Гидровинтовой пресс / В.М.Морогов, А.И. Зимин, Ю.А. Зимин, Ю.А. Бочаров //Открытия, изобретения ... - 1972, - N 7.

22. А.С. 356035, СССР, МКИ, В1 11/00 В30 15/06 Гидровинтовой пресс / В.М. Морогов, А.И.Зимин, Ю.А.Зимин, Ю.А.Бочаров и др. //Открытия, изобретения ... - 1972, - N 32.

23. А.С. 829450, СССР, МКИ, В30В 1/23 Газогидравлический аккумулятор гидровинтового пресса /В.М. Морогов, Ю.К. Бусаров, Цой Л.М. // Открытия, изобретения ... - 1981, - N 18.

24. А.С. 948690, СССР, МКИ, В30В 15/16 Устройство для регулирования энергии удара/В.М.Морогов, Ю.К.Бусаров //Открытия,изобретения ... - 1982, - N 29.

25. Теоретические и экспериментальные исследования ГВПМ, отработка оптимальной схемы пресс-молота, гидропривода, систем управления, виброизоляции и создание общей теории и методики расчета ГВПМ: отчет о НИР (заключит.) / Куйбышевский инж. - строит. инст. (КуйСИ): руководитель Морогов В.М. - ГР7808374; инв.№Б 97У инв.№Б 972042-Куйбышев.,1981-160С.

26. Разработка фундамента дугостаторного пресса Ф1740 и исследование систем пресс - фундамент: отчет о НИР (заключит.) /Куйбышевский инж. - строит. инст. (КуйСИ): руководитель Морогов В.М. ГР78088375; инв.№Б 972043-Куйбышев.,1981-126С

27. Теоретические и экспериментальные исследования систем дозирования и регулирования энергии удара гидровинтовых машин: отчет о НИР (ЗАКЛЮЧИТ.) /Куйбышевский инж. - строит. институт (КуйСИ): руководитель Морогов В.М. - ГР 7906233; инв.№ Б 972744 -К.,1981-151С.

28. Разработка проекта модернизации винтовых прессов модели ЛУН 2500 - 4000 и адаптивной системы их управления применительно к точной штамповке лопаток двигателей: отчет о НИР (заключит.) /Куйбышевский филиал НИИД: руководитель Морогов В.М. ГР7211985; инв.№У15702-Куйбышев.,1985-85С.

29. Исследование процесса штамповки заготовок деталей ГТД методом обкатывания и разработка ТЗ на проектирование специализированного пресса для точной штамповки лопаток двигателей: отчет о НИР (заключит.) / Куйбышевский филиал НИИД; руководитель Морогов В. М. ГР0285103; инв. №27343-Куйбышев., 1987-115С.

Подписано к печати 18.03.96
Заказ 88 объем 2,0 п. л. тир. 100

Типография МГТУ им. Н. Э. Баумана